

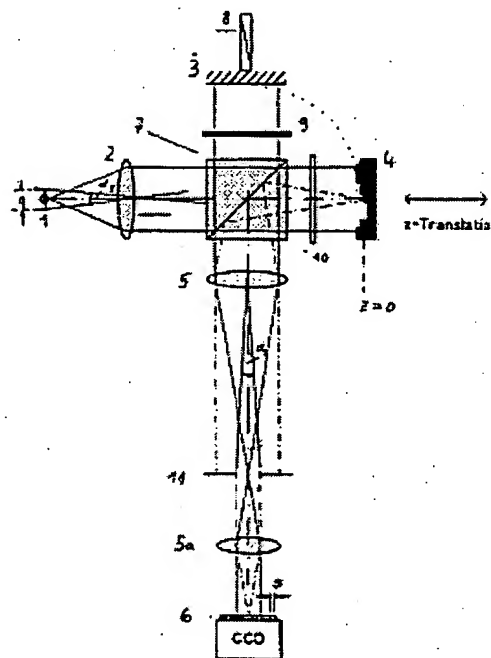
Contactless measurement of surface shape of diffusely scattering objects e.g. semiconductor wafers - using interferometric arrangement for three-dimensional measurement with minimal coherence length and illumination aperture angle less than observation aperture angle

Patent number: DE4108944
Publication date: 1992-09-24
Inventor: HAEUSLER GERD PROF DR (DE)
Applicant: HAEUSLER GERD (DE)
Classification:
- international: G01B9/02; G01B9/02; (IPC1-7): B23Q17/20; G01B9/02; G01B11/30; G01N21/45
- european: G01B9/02S
Application number: DE19914108944 19910319
Priority number(s): DE19914108944 19910319

Report a data error here

Abstract of DE4108944

The interferometric arrangement consists of a light source and optical elements. An unfocussed image of the object is produced by an imaging system. The coherence length of the illumination is as short as possible but not less than the surface roughness depth. The illumination aperture angle is smaller than the observation aperture angle. A photoreceiver is pref. not larger than the average speckle size. The contrast of the interference in each speckle is pref. separately evaluated whilst the light path difference between the object and the reference beam is modulated. The object point distance or roughness depth is derive from the speckle contrast as a function of the light path difference. ADVANTAGE - Highly accurate measurement.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

①⑫ Patentschrift
①⑩ DE 41 08 944 C 2

⑤① Int. Cl.⁵:
G 01 B 9/02
G 01 B 11/30
B 23 Q 17/20

②① Aktenzeichen: P 41 08 944.8-52
②② Anmeldetag: 19. 3. 91
④③ Offenlegungstag: 24. 9. 92
④⑤ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 1. 7. 93

DE 41 08 944 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:
Häusler, Gerd, Prof. Dr., 8520 Erlangen, DE

⑦② Erfinder:
gleich Patentinhaber

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 36 14 332 A1
DE 33 18 678 A1
US 49 13 547

⑤④ Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung eines diffus streuenden Objektes

DE 41 08 944 C 2

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1. Die Oberflächenge-
stalt von Objekten kann z. B. als der Abstand z des
betrachteten Koordinatenpunktes (x, y) zu einer Referen-
zebene, z. B. bei $z=0$, gemessen werden, s. Abb. 1,
Funktion $z(x, y)$. Die meisten industriell hergestellten
Werkstücke haben diffus streuende Oberflächen, wie sie
durch Drehen, Fräsen, Schleifen, Gießen entstehen.
Aber auch nach Lackierung, Galvanisierung, sind viele
Oberflächen optisch rau, d. h. auftreffendes Licht wird
nicht gerichtet, sondern mehr oder weniger diffus re-
flektiert.

Es besteht ein großer Bedarf, solche Objekte für die
automatisierte Sichtprüfung genau zu vermessen. Es
gibt auch bereits etliche 3D-Sensoren, die eine Ver-
messung von $z(x, y)$ ermöglichen. Die wichtigsten Verfahren
sind Triangulation in vielen Ausprägungen, Fokussuche,
Laufzeitmessung und Interferometrie.

Bei genauer Untersuchung der Grenzen der verschie-
denen Methoden stellt man fest, daß mit den meisten
Methoden die Vermessung von rauhen Objekten nur
mit begrenzter Genauigkeit möglich ist. Diese funda-
mentale Beschränkung beruht auf der statistischen Na-
tur des Speckle.

Speckle tritt bei der Beleuchtung von rauhen Oberflä-
chen mit hoher zeitlicher und räumlicher Kohärenz auf.
Der Effekt wurde z. B. beschrieben von G. Häusler, J.
Hutless, M. Maul, H. Weißmann, Appl. Opt. 27,
4638—4644 (1988).

Von G. Häusler, J. M. Herrmann, Appl. Opt. 27,
4631—4637 (1988) wurde gezeigt, daß bei verschiedenen
kohärenten Verfahren die Meßunsicherheit δz bezüg-
lich der Tiefe die Rayleigh-Grenze δz_R nicht nennens-
wert unterschreiten kann. Die Rayleigh-Grenze hängt
von der Beobachtungsapertur $\sin u$ und ggf. dem Trian-
gulationswinkel Θ zwischen Beleuchtungsrichtung und
Beobachtungsrichtung ab.

$$\delta z = \lambda / (\sin u \cdot \sin \Theta)$$

Beispielsweise für praktische Werte $\sin u = 0,05$,
 $\Theta = 30^\circ$, erreicht man mit einer Wellenlänge $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$
nur eine Meßunsicherheit $\delta z \geq 32 \mu\text{m}$. Größere Apertu-
ren und Triangulationswinkel sind technisch unprak-
tisch und führen zu starker Abschattung, so daß man
z. B. nicht in Bohrungen hineinsehen kann. Es sind ver-
schiedene Versuche bekannt, diesen Effekt zu umgehen,
wie z. B. in der DE 36 14 332 A1 beschrieben. Es läßt
sich jedoch feststellen, daß räumlich und zeitlich streng
kohärente Beleuchtung bei Triangulation und Fokussu-
che keine Verringerung der Meßunsicherheit δz erlaubt,
wenn man nicht laterale Auflösung $1/\delta z$ preisgeben will.

Eine Alternative ist die Laufzeitmessung, die mit zeit-
lich modulierter Laserbeleuchtung arbeitet. Wegen der
hohen geforderten Zeitauflösung $1/6t$
($\delta z = 1 \mu\text{m} \rightarrow 6t \approx 10^{-14}\text{s}$) ist diese Methode aber zur Zeit
noch nicht für hochgenaue Messung geeignet. Es bleibt
noch die Interferometrie: Sie ist die klassische Methode
zur Vermessung nicht rauher, also gerichtet reflektie-
render Oberflächen.

Klassische Interferometer arbeiten sowohl mit räum-
lich und zeitlich kohärenter (Laser-)Beleuchtung, als
auch mit räumlich und zeitlich nahezu inkohärenter Be-
leuchtung, also z. B. mit ausgedehnten, weißen Licht-
quellen, wie Glühlampen.

Für rauhe Oberflächen, also z. B. für geschliffenes

aber nicht poliertes Glas, ebenso wie z. B. für gedrehte
oder gefräste Oberflächen eignet sich die Interferome-
trie nicht zur Vermessung. Der Grund ist wieder das
Speckle: Das Bild der kohärent beleuchteten Fläche ist
durch Speckle mit dem Kontrast Eins moduliert, wäh-
rend die inkohärent beleuchtete Fläche keinen Interfe-
renzkontrast zeigt.

Die Phase der Lichtwelle im Bild einer rauhen Ober-
fläche schwankt statisch von Speckle zu Speckle. Wenn
man nun wie bei der Interferometrie üblich, die Objek-
twelle mit der Referenzwelle überlagert, sieht man (statt
regelmäßig geformter makroskopischer Interferenz-
streifen beim blanken Objekt) beim rauhen Objekt nur
einen von Speckle zu Speckle statistisch variierenden
Interferenzkontrast, der mit der makroskopischen
Oberflächenform (die man vermessen will), nicht korre-
liert ist. Damit läßt sich aus dem Interferenzbild keine
Information über $z(x, y)$ gewinnen. Der Kontrast der
Interferenzen verschwindet meist ohnehin, weil die
Speckle einen sehr kleinen Durchmesser haben können
und dann nicht mehr vom Betrachter aufgelöst werden.

Es sind verschiedene Versuche bekannt, diese
Schwierigkeit zu überwinden. Man kann z. B. eine Wel-
lenlänge benutzen, die größer als die Rauhtiefe der
Oberfläche ist: z. B. den CO_2 -Laser mit $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. Eine
verwandte Möglichkeit ist die 2-Wellenlängen-Interfe-
rometrie, wie sie von Fercher et al. in Appl. Opt. 24,
2181—2188 (1985) beschrieben wurde. Baut man ein In-
terferometer mit zwei Beleuchtungs-Wellenlängen λ_1 ,
 λ_2 , so ergibt sich eine effektive Wellenlänge
 $\Lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$. Wenn λ_1 nahe bei λ_2 liegt, wird Λ
groß gegen die Rauhtiefe und der Speckleeinfluß ist
vernachlässigbar. Damit ist auch eine große Meßgenau-
igkeit möglich, allerdings treten bei diesem Verfahren
Eindeutigkeitsprobleme auf, d. h. das Meßergebnis ist
nur bis auf ganzzahlige Vielfache von Λ bekannt.

Hier wird ein anderes interferometrisches Verfahren
vorgeschlagen, mit dem man die Schwierigkeit umgeht,
daß die Interferenzphase im Speckle nichts über die
makroskopische Oberflächenform $z(x, y)$ aussagt. Zur
Vorgeschichte: Es ist bekannt, daß man mit Weißlichtin-
terferenzen z. B. die Höhe von Stufen in polierten Sub-
straten ohne Eindeutigkeitsprobleme bestimmen kann,
weil Weißlicht-Interferenzen nur dort maximalen Kon-
trast haben, wo die Weglängen im Objektarm und im
Referenzarm exakt gleich sind.

Dazu die Abb. 2a: Sie zeigt ein Interferometer mit der
weißen Lichtquelle 1, dem Referenzspiegel 2, dem Ob-
jekt 3. Das Objekt bestehe beispielsweise aus einer Stu-
fe mit einem Höhenversatz Δz . Nach Interferenz der
Objektwelle und der Referenzwelle über den Teiler 4
entsteht in der Bildebene 5 (Linsen hier weggelassen)
ein Interferenzbild wie in Abb. 2b angedeutet, wenn der
Referenzspiegel geringfügig um die Achse 2a gekippt
ist. Der Höhenversatz Δz bewirkt nach Abb. 2b einen
Versatz der Interferenzerscheinung um Δy . Man kann
auch zwei kleine Empfänger an den zu A und B korre-
spondierenden Positionen A' und B' in der Bildebene
anbringen. Wenn nun das Objekt langsam entlang der
z-Richtung bewegt wird, messen die beiden Empfänger
jeweils ein Interferenzsignal $I(A')$ und $I(B')$ nach
Abb. 2c. Die Maxima von $I(A')$ und $I(B')$ sind um Δz
gegeneinander versetzt. Δz läßt sich also daraus bestim-
men.

Die Methode funktioniert aber nicht ohne weiteres
für rauhe Oberflächen.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe
zugrunde, ein Verfahren zur dreidimensionalen Vermes-

sung eines diffus streuenden Objektes anzugeben.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

Dieses Verfahren vermeidet nicht Speckle, sondern macht ausdrücklich Gebrauch davon und benutzt eine spezifisch abgestimmte Beleuchtung. Die Anordnung ist eine interferometrische, z. B. wie die in Abb. 2. Dort wird ein Michelson Interferometer benutzt, aber auch die meisten anderen Interferometer sind geeignet. Wesentlich ist, daß die Beleuchtungsapertur, die Beobachtungsapertur, die Kohärenzlänge der Lichtquelle, die Rauhtiefe des Objektes und die Größe des Photoempfängers (Pixels) (oder der Photoempfänger) in der Bildebene aufeinander abgestimmt sind, in der im Patentanspruch 1 beschriebenen Weise.

Um dies zu gewährleisten, müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein. Abb. 3 beschreibt beispielhaft die Verhältnisse: Die ausgedehnte Lichtquelle 1 mit dem Durchmesser q wird von der Beleuchtungslinse 6 vorzugsweise ins Unendliche abgebildet. Vom Objekt 3 erscheint die Quelle unter dem Beleuchtungsaperturwinkel α_1 . Das Objekt 3 ebenso wie der Referenzspiegel 2, werden über den Teiler 4 von den Abbildungslinsen 7, 8 auf den Photoempfänger 5a abgebildet. Die Eintrittspupille der Abbildungslinse erscheint vom Objekt unter dem Beobachtungswinkel α_0 . Im Fall von Abb. 3 ist die Beobachtungsapertur durch die Telezentrielle 9, gemeinsam mit der Linse 7 gegeben. Der Referenzspiegel 2 kann zur Erzeugung einer Modulation des Interferenzkontrastes zusätzlich zu einer Grobbewegung schnell fein verschoben werden, z. B. durch ein Piezo-Stellelement 10. Weiter befinden sich im Strahlengang zur Optimierung des Interferenzkontrastes ein Graufilter 11, sowie zum Ausgleich der Dispersion unterschiedlicher Glaswege, eine Glasplatte 12. Das Objekt, der Referenzspiegel oder der gesamte Sensorkopf bestehend aus allen Elementen außer dem Objekt können in z-Richtung bewegt werden.

Damit überhaupt Speckle beobachtbar sind, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein: Erstens muß der Beleuchtungsaperturwinkel kleiner oder gleich dem Beobachtungsaperturwinkel sein.

Weiter soll die Kohärenzlänge der Lichtquelle möglichst klein sein, damit die Interferenzen nach Abb. 2c genau lokalisiert werden können. Die Kohärenzlänge darf aber nicht kleiner als die Rauhtiefe der zu vermessenden Oberfläche sein, da sonst der Specklekontrast verschwindet, und damit die Möglichkeit, eine Interferenzerscheinung nach Abb. 2c zu beobachten.

Der Beobachtungsaperturwinkel nach Abb. 3 bestimmt nicht nur gemeinsam mit der Beleuchtungsapertur den Specklekontrast, er bestimmt auch die Speckle-Größe d . Die Speckle-Größe darf nicht kleiner als die Größe s eines einzelnen Photoempfängers auf dem Feld der Photoempfänger 5a (z. B. auf einer nachgeschalteten Fernsehkamera) in der Bildebene sein. Es gilt $d \approx s / \sin \alpha_0$.

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, kann der optimale Specklekontrast erzielt werden. Es läßt sich dann bei rauen Objekten in jedem Speckle ein individuelles Signal $I(x)$ wie in Abb. 2c abnehmen, wenn das Objekt (oder der Referenzspiegel) entlang der z-Achse bewegt wird. Dies ist möglich, weil innerhalb eines jeden Speckle die Phase annähernd konstant ist, obwohl sie aber von Speckle zu Speckle statisch schwankt. Diese Schwankungen der Phase betragen von Speckle zu Speckle oft erhebliche Vielfache von 2π , was eine effektive Weglängendifferenz der Wellenzüge zwischen benachbarten

Speckles zur Folge hat.

Der Ort des maximalen Interferenzkontrastes ist damit wegen des fundamental anderen Mechanismus der Signalentstehung in der Bildebene auch nicht ohne Fehler direkt mit der makroskopischen Form der zu vermessenden Oberfläche verknüpft.

(Dies ist anders bei polierten Objekten). Es gibt bei rauen Objekten vielmehr statische Schwankungen des maximalen Kontrastes, wie in Abb. 4 gezeigt. Dort ist die Interferenzerscheinung als Funktion von x und z aufgetragen.

Theoretische Untersuchungen zeigen, daß die daraus resultierenden statistischen Fehler der z-Bestimmung in der Größenordnung der Rauhtiefe des Objektes liegen. Damit ist die Methode auch geeignet, aus der statistischen Variation des gemessenen z-Wertes die Rauhtiefe zu bestimmen. Daß die Fehler nur von der Rauhtiefe des Objektes, jedoch nicht von der Abbildungsapertur abhängen, ist der wesentliche Fortschritt dieses Verfahrens gegenüber fast allen sonstigen 3D-Verfahren, insbesondere der Lasertriangulation. Man kann also mit sehr geringer Apertur in Bohrungen hineinschauen und trotzdem eine extreme Tiefengenauigkeit erzielen.

Für die parallele Erfassung von $z(x, y)$ für ein 2-dimensionales Feld von Punkten (x, y) wird zweckmäßig eine Fernsehkamera gewählt. Der Meßvorgang kann beispielsweise wie folgt verlaufen: Das Objekt wird langsam — z. B. in Schritten — durch die Ebene $z=0$ (s. Abb. 3) in z-Richtung hindurchgefahren. Bis ein bestimmter Objektpunkt (x, y) die Ebene $z=0$ passiert, muß er z. B. um z' verschoben werden. Für jeden Tiefenschritt werden z. B. drei Interferenzbilder $O_1, 2, 3$ gespeichert.

Für jedes Bild wird, z. B. mit Hilfe eines Piezo-Referenzspiegels 10 die Phase um 120° verschoben. Mit der mittleren Intensität $\langle O \rangle$ eines Pixels kann man den Kontrast der Interferenzen ausrechnen aus $K = \sum_i (O_i - \langle O \rangle)^2$. K ist eine Funktion der Objektverschiebung. Wenn der betrachtete Objektpunkt gerade bei $z=0$ liegt, ist der Kontrast maximal und die Entfernung des betrachteten Objektpunktes von der Referenzebene ist z' .

Man kann auch zur Tiefenabtastung den Referenzspiegel bewegen, was sinnvoll ist, wenn das Objekt groß ist und die Bewegung schnell erfolgen soll. Die Bewegung des Objektes hat den Vorteil, daß die Kamera immer auf die Ebene $z=0$ fokussiert ist, es existiert kein Schärfentiefeproblem bei der Abbildung und es gibt vollständige Telezentrie, d. h. der Abbildungsmaßstab ist unabhängig von der Entfernung des Meßpunktes.

Eine Ausprägung ist dadurch gekennzeichnet, daß die möglichst punktförmige Lichtquelle auf das Objekt und gleichzeitig näherungsweise auf den Referenzspiegel abgebildet wird. Die Methode arbeitet als Punktsensor. Um das Objekt flächenhaft oder linienhaft zu vermessen, muß der Sensor die Oberfläche zweidimensional oder eindimensional abtasten. Der Referenzspiegel kann entweder ein gewöhnlicher Spiegel sein, oder eine Schraubenfläche bilden, wie sie in Abb. 5 dargestellt ist. Wenn die Spiegelschraube um die Achse 13 rotiert, wird der Referenzlichtweg mit konstanter Geschwindigkeit moduliert.

Die Auswertung ist in Abb. 6 dargestellt: der beleuchtete Objektpunkt wird auf die kleine Blende 14 abgebildet, hinter der der Photoempfänger 15 steht. Wenn die Schnecke um die in Abb. 5 gezeichnete Achse 13 rotiert, wird der Referenz-Lichtweg linear mit der Zeit moduliert. Der Photostrom ist mit einer konstanten Frequenz

f moduliert, die sich aus der Steigung m der Schnecke, der Umdrehungszahl U [sec⁻¹] und der Wellenlänge λ ergibt:

$$f = m \cdot U / (\lambda/2).$$

Das Signal I(t) der Photodiode ist wie in Abb. 2c dargestellt. Nach Verstärkung 16 und Bandpaßfilterung 17 erhält man ein Signal mit wenig Rauschen, das einfach durch Gleichrichtung 18 und Tiefpaßfilterung 19 demoduliert wird. Vom demodulierten Signal, von dem Abb. 6a ein Oszillogramm zeigt, braucht man nur noch das Maximum zu bestimmen, um den Zeitpunkt t', der zur Tiefe z' gehört, zu ermitteln.

Eine Ausprägung dieses Punktsensors ist in Abb. 7 wiedergegeben, die mehrere andere Merkmale enthält, die mit den oben beschriebenen Ausprägungen kombinierbar sind:

Zunächst wird die vorzugsweise kleine Lichtquelle 1 über die Linse 20 auf das Objekt 3 abgebildet. Das Referenzsignal wird über den Teiler 4, den Umlenkspiegel 21 auf den Referenzspiegel 2 geleitet. Das Interferenzsignal wird in der Pupille ausgewertet, auf die gleiche Weise, wie in Abb. 6 dargestellt. Die Blende 14 und der Photoempfänger 15 befinden sich nun im Fresnel Feld des Objektes, es gibt keine Abbildung des Objektes mehr. Diese Modifikation erspart Linsen und eine genaue Justierung. Außerdem sind die Speckle in der Pupille größer und einfacher auszuwerten. Die Anordnung nach Abb. 7 hat zusätzlich einen gefalteten Referenzarm (2, 4, 21), um den Sensorkopf kompakter zu machen. Eine besonders einfache Modifikation ergibt sich, wenn der Sensorkopf insgesamt, z. B. mit einem Roboterarm mit konstanter Geschwindigkeit in z-Richtung bewegt wird, wobei die Auswertung wie nach Abb. 6 erfolgt.

Eine weitere vorteilhafte Ausprägung des Meßprinzips, mit der man sich die Tiefenabtastung ersparen kann, ergibt sich durch Einführung von Dispersion, s. Abb. 8: Die punkt- oder linienförmige nicht monochromatische Quelle 1 wird mit der Linse 22 zunächst auf einen Spektrometerspalt 23 abgebildet, sodann mit der Linse 24 über den Teiler 4 auf das Objekt 3. Wenn das Objekt gekrümmt ist, wie in Abb. 8 dargestellt, erscheint in der gezeichneten Ansicht ein Lichtprofil 25 auf dem Objekt. Im Referenzstrahlengang wird die Lichtquelle über den Teiler auf den Referenzspiegel 2 abgebildet. In einem Interferometerarm (hier im Referenzarm) wird ein dispergierendes Element, z. B. eine Glasfaser, oder Glasplatte 26 eingefügt. Dies bewirkt, daß die verschiedenen Wellenlängen verschiedene Lichtwege zurücklegen.

Auf der Abbildungsseite wird mit der Linse 27 das Profil 25 und das über den Referenzarm laufende Lichtquellenbild gemeinsam in die Bildebene 28 abgebildet. Durch das Prisma 29 oder ein anderes dispergierendes Element, wie z. B. ein Gitter, werden die verschiedenen Wellenlängen örtlich getrennt. Das Bild wird beispielsweise mit einer Fernsehkamera aufgenommen und der Kontrast der Interferenzerscheinung örtlich ausgewertet. Die Stellen maximalen Kontrastes beschreiben auf dem Fernsehtarget eine i. a. gekrümmte Kurve 30, die das Profil 25 oder den Schnitt durch die zu vermessende Oberfläche liefert. Diese Ausgestaltung des Sensors fungiert also als Liniensensor. Eine Modifikation als Punktsensor entsteht einfach durch Verwendung einer punktförmigen Quelle.

Patentansprüche

1. Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung eines diffus streuenden Objektes,

- bei dem eine interferometrische Anordnung verwendet wird, mit
- einer Lichtquelle (1), die vom Objekt (3) aus unter einem Beleuchtungsaperturwinkel (α_1) erscheint, und
- einem Abbildungssystem (7, 8, 9), das vom Objekt aus unter einem Beobachtungsaperturwinkel (α_0) erscheint,

dadurch gekennzeichnet, daß

- die Lichtquelle (1) so gewählt wird, daß ihre Kohärenzlänge zur Erzielung eines Specklekontrastes einerseits nicht kleiner ist als die Rauhtiefe der Oberfläche des Objektes (3) und andererseits so gering ist, daß eine genaue Lokalisierung der Interferenzen möglich ist,
- die interferometrische Anordnung so gewählt wird, daß der Beleuchtungsaperturwinkel (α_1) kleiner oder höchstens gleich dem Beobachtungsaperturwinkel (α_0) ist,
- ein oder mehrere Photoempfänger (5a) vorgesehen werden, die jeweils nicht größer sind als die mittlere Specklegröße des entstehenden Specklemusters,
- die Lichtwegdifferenz zwischen Objekt- und Referenzstrahlengang moduliert wird und dabei der Kontrast in jedem Speckle getrennt ausgewertet und als Funktion der Lichtwegdifferenz erfaßt wird und
- für jedes Speckle aus der dem maximalen Kontrast zugeordneten Lichtwegdifferenz die Entfernung des betrachteten Objektpunktes von einer Referenzebene bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt (3) in eine Bildebene abgebildet wird, in der ein Feld von Photoempfängern (5a) angeordnet ist, daß in der interferometrischen Anordnung ein Referenzspiegel (2) angeordnet ist, mit dessen Hilfe eine phasenmodulierte Welle erzeugt wird, und daß der Signalkontrast der Photoempfänger (5a) einzeln ausgewertet wird, während der Referenzspiegel (2), das Objekt (3) oder die gesamte interferometrische Anordnung (1, 2, 4—12) entlang der optischen Achse bewegt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt (3) punktförmig beleuchtet wird, und der beleuchtete Punkt in eine Bildebene abgebildet wird, und dort mit einem Photoempfänger, der nicht größer als der Speckledurchmesser ist, der Kontrast der Interferenzerscheinung ausgewertet wird, während das Objekt, der Referenzspiegel oder die gesamte interferometrische Anordnung entlang der optischen Achse bewegt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt punktförmig beleuchtet wird, und daß im Fresnel'schen Beugungsbild des Objektes mit Hilfe eines Photoempfängers, der nicht größer als der dort beobachtbare Speckledurchmesser ist, der Kontrast der Interferenzerscheinung ausgewertet wird, während das Objekt, der Referenzspiegel oder die gesamte interferometrische Anordnung entlang der optischen Achse bewegt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—4, da-

durch gekennzeichnet, daß die Lichtwegmodulation durch Rotation eines schraubenförmig geformten Spiegels erfolgt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—5, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswertung des Interferenzkontrastes durch Bandfilterung, Gleichrichtung und Tiefpaßfilterung des Photoempfängersignals erfolgt, wobei der Schwerpunkt oder das Maximum des verarbeiteten Photoempfängersignals durch Interpolationsmethoden genau bestimmt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—5, dadurch gekennzeichnet,

— daß in einem Interferometerarm ein Material mit Dispersion eingefügt wird und so für verschiedene Wellenlängen verschiedene Lichtwege entstehen und

— daß am Interferometerausgang die verschiedenen Wellenlängen räumlich getrennt werden und auf einem Feld von Photoempfängern der lokale Kontrast der Interferenzerscheinung bestimmt wird und daraus die Form des Objektes bestimmt wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

25

30

35

40

45

50

55

60

65

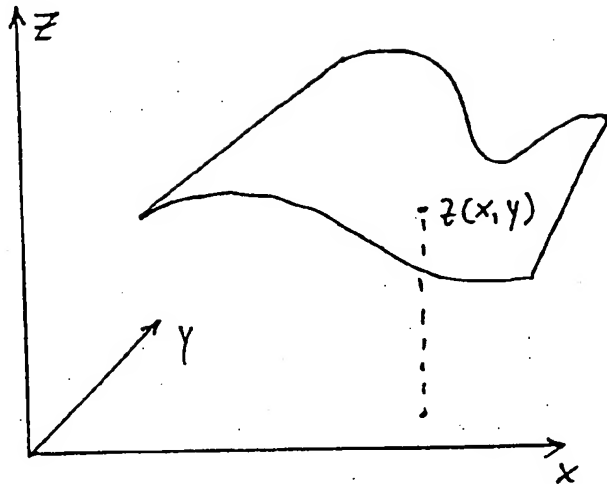


Abb. 1

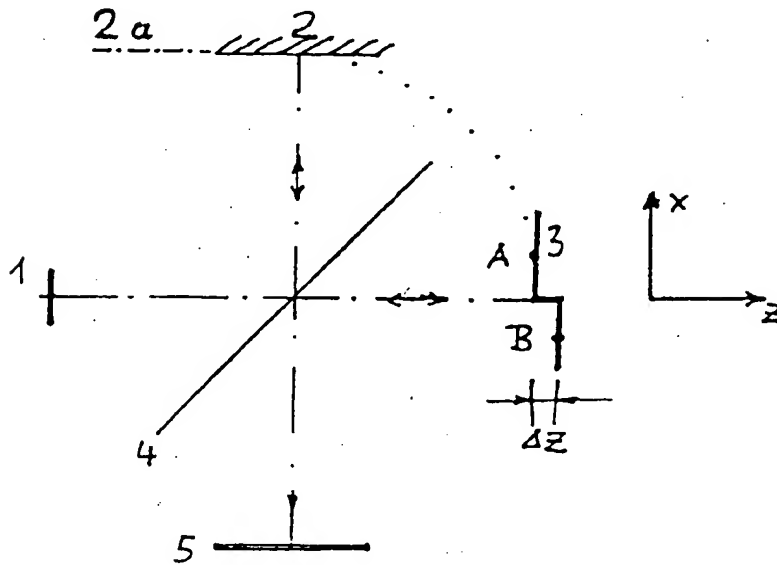


Abb. 2a

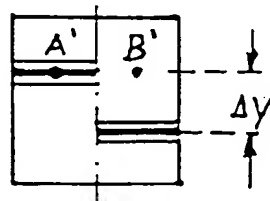


Abb. 2b

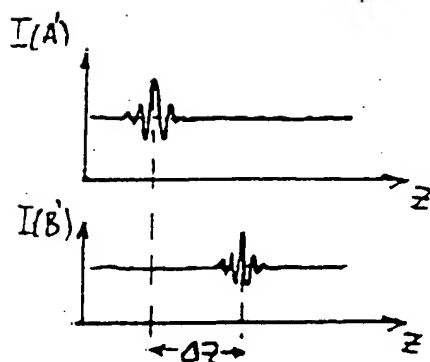
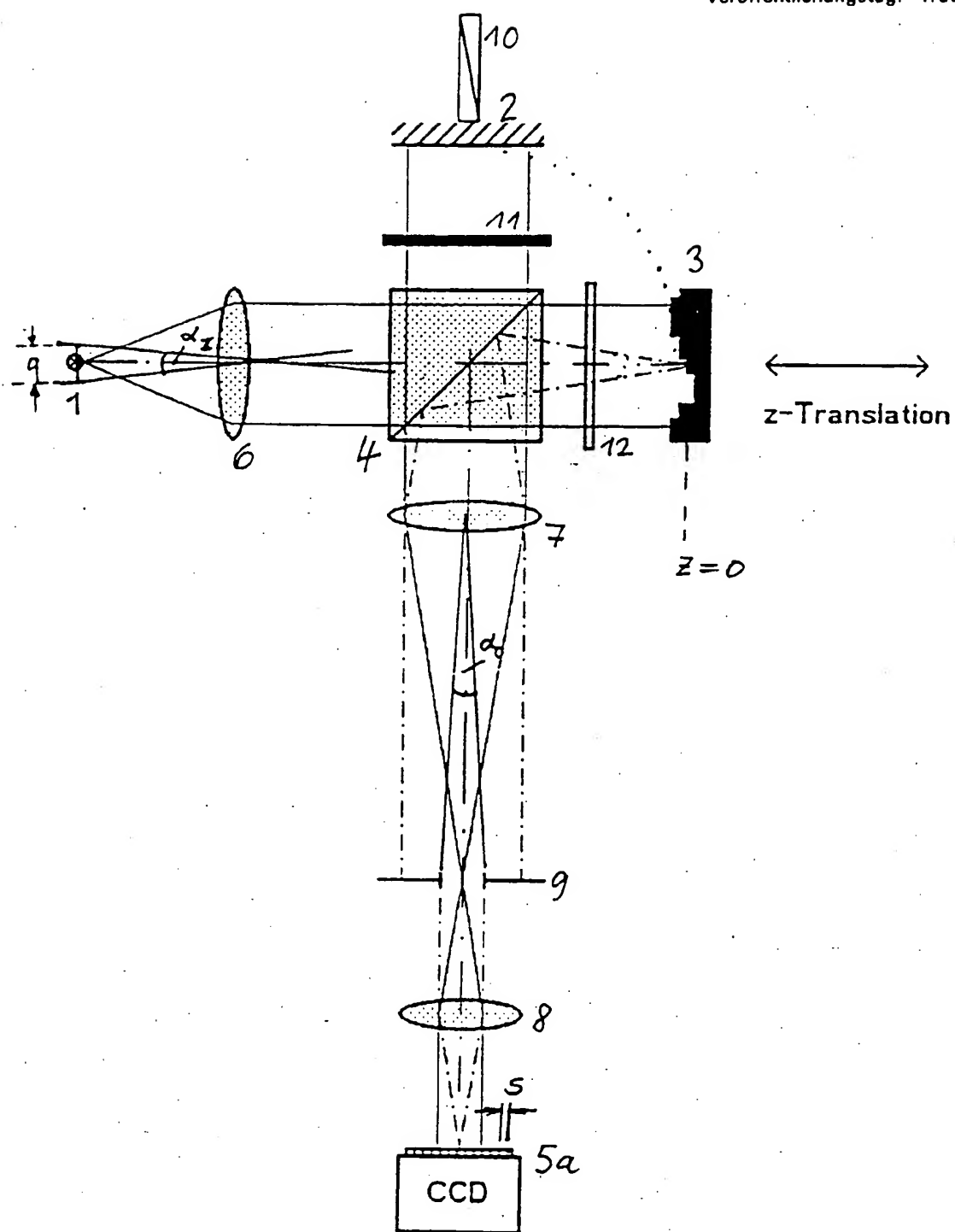


Abb. 2c



BEST AVAILABLE COPY

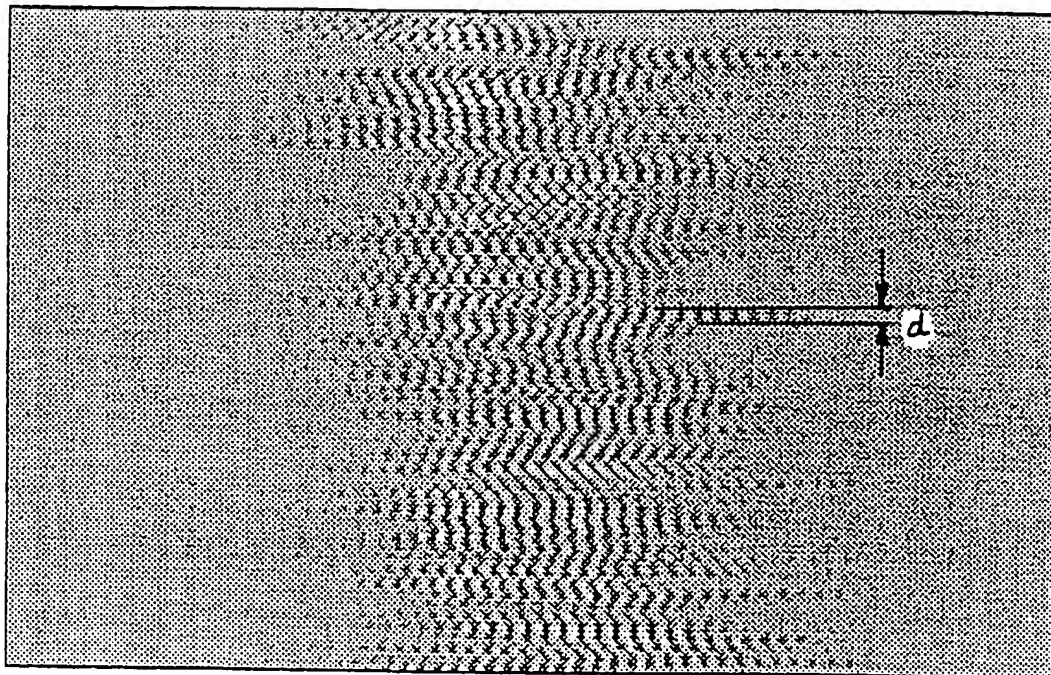
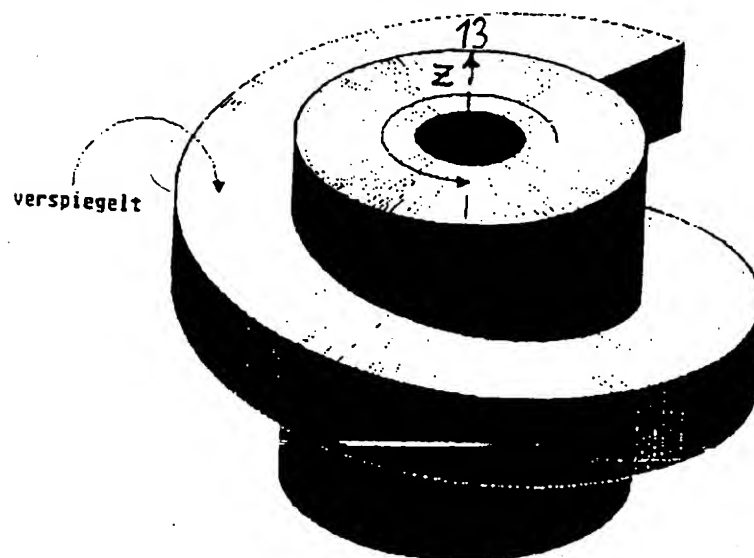
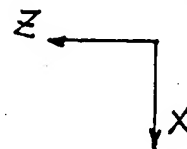


Abb. 4



BEST AVAILABLE COPY

Abb. 5

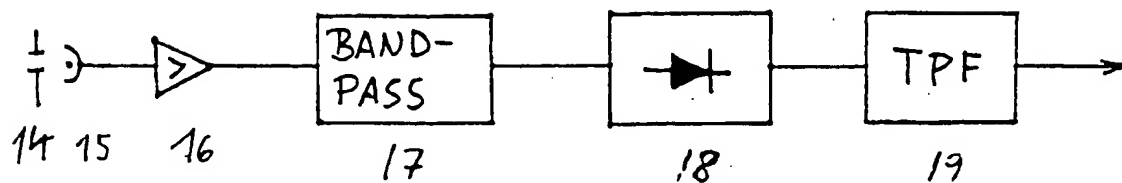


Abb. 6

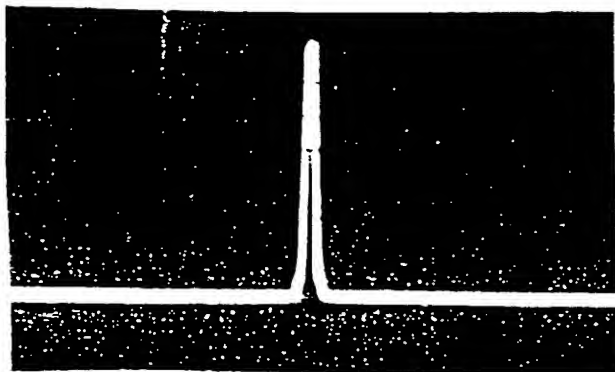


Abb. 6a

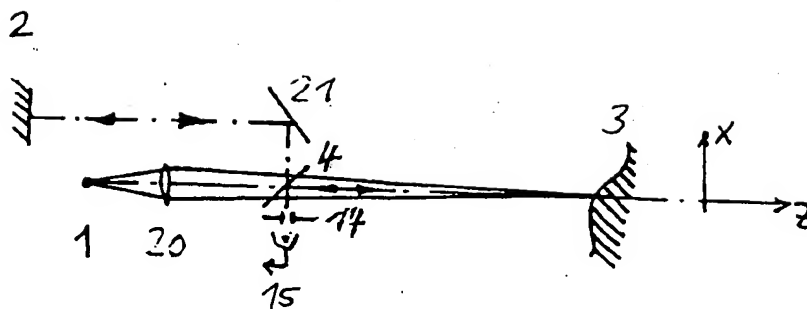


Abb. 7

BEST AVAILABLE COPY

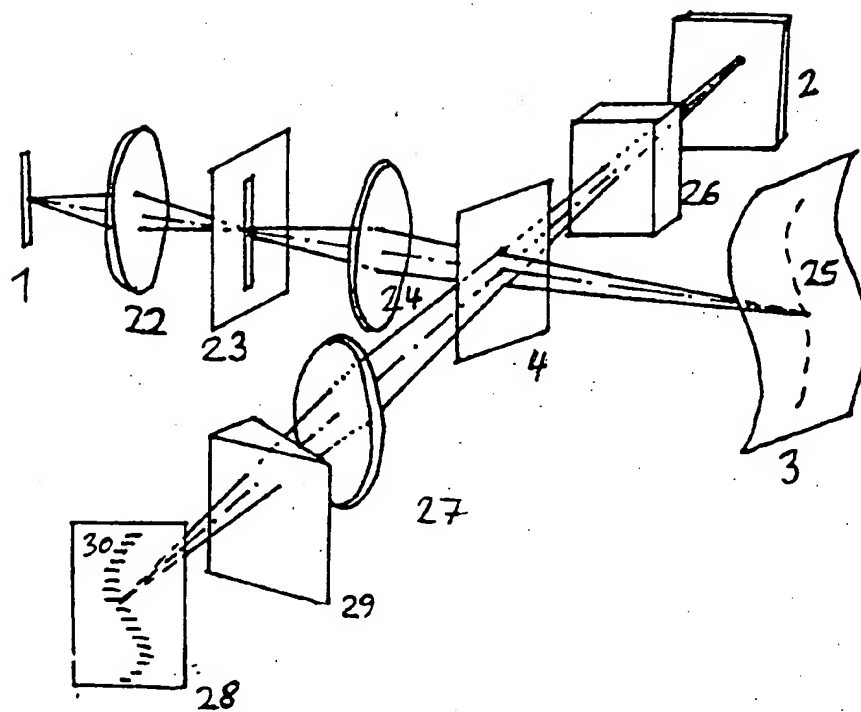


Abb. 8

BEST AVAILABLE COPY